

На правах рукописи

УДК 669.15-194.001.573

**ПОПОВ Владимир Владимирович**

**РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ  
УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ БЕСКОКСОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
СХЕМ ПЕРЕРАБОТКИ РУД С ПОЛУЧЕНИЕМ ЛЕГИРОВАННОЙ И  
НЕЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ**

**Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких  
металлов**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Екатеринбург 2013**

Работа выполнена на кафедре автоматики ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель - Действительный член АИН РФ,  
Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
профессор, доктор технических наук  
В.Г. ЛИСИЕНКО

Официальные  
оппоненты: Дмитриев Андрей Николаевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
Институт металлургии УрО РАН,  
главный научный сотрудник лаборатории  
пиromеталлургии черных металлов

Цикарев Владислав Григорьевич,  
кандидат технических наук,  
ЗАО «Научно-производственное  
предприятие ФАН», главный инженер

Ведущая организация: ОАО "Научно-исследовательский институт  
металлургической теплотехники -  
ВНИИМТ"

Защита диссертации состоится **«06» декабря 2013** г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28, Аудитория МТ-509, 3 Учебный корпус.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Автореферат разослан

«    » ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

С.В. Карелов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время проблема разработки и усовершенствования новых бескоксовых способов получения легированных сталей и сплавов остро стоит во многих отраслях промышленности: машиностроении, строительстве, автомобилестроении.

Выбор в качестве альтернативного метода переработки железосодержащих отходов бескоксовой технологии объясняется рядом причин. Новые технологии не требуют использования дорогостоящего кокса в качестве компонента шихты, удовлетворяют ряду положений экологически чистого производства, обеспечивают высокое качество продукции, позволяют более эффективно перерабатывать производственные отходы.

Проблема кокса связана с ограниченностью запасов коксующих углей, ухудшением их качества и технико-экономических показателей добычи и переработки. Снижение его качества (прочность, содержание золы и серы), вызывает ухудшение технико-экономических показателей доменной плавки. Таким образом, основным преимуществом бескоксовых схем является использование дешевых углей и различных по составу и крупности железорудных материалов.

Повышенный интерес к исследованию сложных высокотемпературных, энерготехнологических процессов в металлургии, объясняется тем, что металлургия в целом является одной из наиболее энергоемких отраслей промышленности и одним из крупнейших источников загрязнения окружающей среды. Источником загрязнения атмосферы органическими веществами на металлургических заводах является коксохимическое производство. В настоящее время на охрану окружающей среды в развитых странах затрачивается до 15-20% и более от общих капитальных вложений в черную металлургию. Бескоксовая металлургия оказывает меньшее отрицательное воздействие на окружающую среду. В частности, объемы выбросов пыли и содержание в них вредных элементов в процессах жидкофазного восстановления примерно в 4 раза ниже, чем в доменном производстве.

Экономические расчеты свидетельствуют о том, что капитальные затраты в традиционные и бескоксовые способы производства металла сопоставимы в промышленно развитых странах, а в развивающихся странах, обладающих запасами природного газа, бескоксовый способ производства стали предпочтителен.

Для мировой и российской, в особенности уральской, металлургии крайне важной является проблема выплавки легированных сталей при комплексной переработке полиметаллических руд. Около 10% всех выплавляемых сталей являются легированными. Ванадий приобрел особое значение как микролегирующий элемент, способный даже в малых концентрациях (0,03-0,15%) существенно повышать ряд эксплуатационных характеристик сталей и чугунов. Известно несколько способов выплавки ванадиевых сталей, которые условно можно разделить на две основные группы по принципу использования или не использования кокса, причем каждый имеет свои преимущества и недостатки.

Переработка качканарских титаномагнетитов по бескоксовой схеме позволяет проводить прямое легирование стали ванадием, что существенно повышает степень извлечения.

Наиболее эффективной схемой выплавки легированной ванадием стали является альтернативный бескоксовый способ получения стали, так называемое легирование прямое – ЛП. Он разработан УрФУ (УГТУ-УПИ) и РУО АИН им.

Прохорова А.С. (Лисиенко В.Г., Пареньков А.Е. и др.) в содружестве с рядом организаций (Институт металлургии УрО РАН, МИСиС, Уральский институт металлов, Уралгипромет) с целью удешевления процесса получения легированной ванадием стали при том же относительном расходе ванадийсодержащих материалов. Этот способ был усовершенствован (Лисиенко В.Г., Соловьева Н.В. и др.). Однако ряд проблем остались: высокое содержание фосфора в стали и недостаточно эффективное использование энергии на стадии выплавки стали в газификаторе процесса жидкофазного восстановления (ПЖВ). С целью устранения вышеописанных недостатков необходимо усовершенствовать схему бескоксового процесса ЛП, сделав оценку его энерго-экологической эффективности.

Марганцевые стали, на данный момент, являются также одними из самых перспективных благодаря наличию TRIP-TWIP-эффекта, обеспечивающего их повышенную прочность. Однако при выплавке сталей и сплавов с повышенным содержанием марганца стоит та же основная проблема, что и при выплавке сталей, легированных ванадием – необходимы технологии их дефосфорации и снижения энергоемкости.

Основными направлениями в исследованиях эффективности металлургических процессов на протяжении многих лет являлись, в первую очередь, анализ затрат топлива и энергии и оценка эффективности использования энергии в данном процессе. Поэтому, именно эти аспекты оценки эффективности высокотемпературных энерготехнологических процессов являются базовыми при оценке эффективности новых схем получения сталей и сплавов.

Существует несколько вариантов расчета оценки энергоемкости суммарных энергозатрат процесса: классический балансовый метод, расчетно-статистический метод, методика макрообменного анализа взаимосвязанных физико-химических и теплообменных процессов, расчет технологических топливных чисел (ТТЧ) готовой продукции и другие.

Анализ взаимосвязанных физико-химических и теплообменных процессов и сквозной энергетический анализ проводятся именно на основе метода сведения материальных и тепловых балансов процесса. Оценка энерго-экологической эффективности процесса будет полной, если будет содержать расчет материальных и тепловых балансов и расчет сквозного энерго-экологического анализа.

Цель работы. На основании вышеизложенного целью настоящей работы явилось разработка (усовершенствование) новых бескоксовых способов получения легированной ванадием стали, и получения высокомарганцевой стали с содержанием Mn выше 20%, а также оценка и анализ энерго-экологической эффективности новых способов.

В рамках поставленной цели работы, сформулированы следующие задачи:

- Провести сравнительный анализ существующих технологий выплавки легированных ванадиевыми и марганцевыми сталей и сплавов, а также методов оценки эффективности металлургических процессов, с целью понимания существующего положения в металлургической отрасли, и перспектив бескоксовых схем выплавки стали;
- Проанализировать методики оценки энерго-экологической эффективности разрабатываемых металлургических производств;
- Проанализировать перспективы усовершенствования схемы процесса ЛП (процесс ЛП-Э) с агрегатом ПЖВ, работающим на двух источниках энергии – энергии сгорания угля и электроэнергии, с целью максимального снижения затрат угля в ПЖВ, и, как следствие, максимального снижения вредных примесей, прежде

всего, фосфора, в выплавляемом чугуна и в легированной ванадием стали. Оценить результаты предлагаемых технологических решений с помощью сквозного энерго-экологического анализа.

- Проанализировать перспективы усовершенствования схемы выплавки легированной ванадием стали из комплексной шихты (процесс ЛП-Ш), с целью снижения в ней примесей цветных металлов, уменьшения материальных и энергетических затрат на процесс металлизации окатышей (брикетов) при сохранении их металлической прочности. Использование в шихте жидкого чугуна обеспечивает дополнительное снижение расхода электроэнергии. Оценить результаты предлагаемых технологических решений с помощью сквозного энерго-экологического анализа.

- Проанализировать перспективы разработки схемы выплавки конструкционной нелегированной стали (на основе схемы процесса ЛП), с целью снижения в ней примесей цветных металлов, путем снижения расхода угля и лома. Оценить результаты предлагаемых технологических решений с помощью сквозного энерго-экологического анализа.

- Проанализировать перспективы разработки комбинированной схемы выплавки высокомарганцевой стали с содержанием Mn выше 20%, с целью обеспечения повышенной прочности стали. Оценить результаты предлагаемых технологических решений с помощью оценки его энерго-экологической эффективности и верификации расчетных данных с экспериментальными данными.

**Научная новизна.** На основании проведенных исследований были получены новые научные результаты:

- Предложена схема процесса ЛП (процесс ЛП-Э): в которой в агрегат печи жидко-фазного восстановления (ПЖВ) введен дополнительный источник энергии – электроэнергия - с целью максимального снижения затрат угля в ПЖВ, и, как следствие, снижения концентрации вредных примесей стали и повышение ее качества.

- Рассчитана оценка энерго-экологической эффективности процесса ЛП-Э на основе расчета материальных и тепловых балансов каждого агрегата технологической цепочки.

- Проведен сквозной энерго-экологический анализ процесса ЛП-Э. Получены сравнительные данные с предыдущей схемой ЛП, и с традиционным способом.

- Предложена схема процесса ЛП (процесс ЛП-Ш): для которого, рассчитан наиболее эффективный состав шихты ЭДП с целью снижения примесей цветных металлов в стали, поступающих из металлического лома. Таким образом, в шихте дуговой электропечи применяются металлизированные окатыши или брикеты, не содержащие оксида титана (30-50%), ванадийсодержащий или литейный чугун (10-15%) и металлический лом 35-60%. Тем самым доля металлического лома при выплавке легированных ванадием сталей уменьшится в 1,5-2,5 раза, что, соответственно, приведет к снижению насыщения стали цветными металлами.

- Рассчитана оценка энерго-экологической эффективности процесса ЛП-Ш на основе расчета материальных и тепловых балансов.

- Проведен сквозной энерго-экологический анализ процесса ЛП. Получены сравнительные данные с предыдущей схемой ЛП, и с традиционным способом.

- Предложена схема выплавки нелегированной конструкционной стали с целью снижения энергоемкости стали.

- Рассчитана оценка энерго-экологической эффективности процесса на основе расчета материальных и тепловых балансов каждого агрегата технологической

цепочки. Проведен сквозной энерго-экологический анализ нового процесса. Получены сравнительные данные с предыдущей схемой ЛП, и с традиционным способом.

- Впервые предложена схема выплавки высокомарганцевой стали с содержанием Mn выше 20%, с использованием в качестве сырья низкомарганцевистой руды.

- Экспериментально подтверждено, что предложенный способ выплавки высокомарганцевистой стали, обеспечивает получение стали с содержанием Mn выше 20%.

- Рассчитана оценка эффективности процесса выплавки высокомарганцевистой стали на основе материальных и тепловых балансов процесса, и проведена верификация экспериментальных и расчетных данных.

- Подано четыре заявки на изобретение.

#### Положения, выносимые на защиту.

1. Усовершенствованная схема процесса ЛП-Э с агрегатом ПЖВ, работающим на двух источниках энергии – энергии сгорания угля и электроэнергии, с целью максимального снижения затрат угля в ПЖВ, и, как следствие, максимального снижения вредных примесей, прежде всего, фосфора, в выплавляемом чугуна и в легированной ванадием стали.
2. Усовершенствованная схема ЛП-Ш выплавки легированной ванадием стали из комплексной шихты, с целью снижения в стали примесей цветных металлов, снижения материальных и энергетических затрат на процесс металлизации окатышей (брикетов) при сохранении их металлической прочности. Использование в шихте жидкого чугуна обеспечивает дополнительное снижение расхода электроэнергии.
3. Оптимизированная схема выплавки качественной нелегированной стали с использованием металлизированного рудного сырья.
4. Разработанная схема выплавки высокомарганцевой стали с содержанием Mn выше 20%, с целью обеспечения повышенной прочности стали, за счет появления TWIP-эффекта.
5. Результаты исследований процесса ЛП с помощью расчета оценки его энерго-экологической эффективности.
6. Результаты исследований процесса выплавки высокомарганцевой стали с помощью рассчитанной оценки его энерго-экологической эффективности и верификации расчетных данных с экспериментальными данными.

**Научная и практическая значимость.** Разработка новых способов производства сталей, направлена на обеспечение нужд промышленности в высококачественных сталях с низким содержанием фосфора и других вредных примесей. Реализация предлагаемых схем может способствовать решению ряда проблем, таких как получение высокомарганцевистой стали из дешевого сырья (низкомарганцевая руда); получение сталей легированных ванадием по бескоксовой технологии с одновременным снижением энергоемкости процессов, и снижением величины вредных выбросов. О реальной практической значимости изучаемых технологий свидетельствует тот факт, что отдельные элементы процесса легирования прямое ванадием ЛП-В уже используются в практической деятельности ряда предприятий. В частности опытно-промышленный агрегат ПЖВ запущен на Балхашском заводе ОЦМ; работа агрегата ПЖВ в режиме газификации была опробована во время опытной эксплуатации агрегата (процесс РОМЕЛТ) на Ново-Липецком металлургическом комбинате; шахтные печи металлизации

окатышей успешно работают на ряде заводов (Оскольский электрометаллургический комбинат, Лебединский ГОК) и проектируются на Михайловском ГОКе.

Процесс выплавки нелегированной конструкционной стали (в несколько измененном виде) используется в работах австрийской фирмы Linz. Представляет интерес и получившая практическое использование модификация процесса COREX в какой-то мере реализующая идею процессов ЛП использования восстановительного газа газификации для восстановительных процессов и металлизации в установках прямого восстановления железа.

Также на заводе «Айскор» в ЮАР в шихте ЭДП, как и предусмотрено в процессе ЛП, используется жидкий чугун и металлизированные окатыши.

С помощью экспериментальных и расчетных данных разработана схема выплавки высокомарганцевой стали с содержанием Mn выше 20%, с целью обеспечения повышенной прочности стали, за счет появления TWIP-эффекта.

Экспериментальные испытания по выплавке высокомарганцевой стали направлены на производство высокопрочной автомобильной стали, что имеет значение не только для российских предприятий, но и для зарубежных автомобильных концернов, в том числе концерна Volkswagen AG.

Данные материалы являются подготовительными для выработки технического задания на проектирование опытно-промышленных установок. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ИРИТ-РтФ УрФУ.

**Степень достоверности полученных результатов.** Достоверность полученных результатов определяется использованием современных методик анализа и расчета эффективности металлургических процессов, а также набором исходных данных, полученных в предыдущих исследованиях на основе комплекса современных программных продуктов (Excel, Analiz, Delphy 6). Достоверность выводов по разработанной схеме выплавки высокомарганцевистой стали подтверждена согласием предварительных расчетных и полученных экспериментальных результатов.

**Личный вклад автора.** Постановка задач исследования и анализ полученных результатов выполнялись автором самостоятельно при участии научного руководителя В.Г. Лисиенко. Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии. Автору принадлежит интерпретация результатов и формулировка основных положений и выводов. Основным методом исследования в настоящей работе является расчет оценки эффективности металлургических производств на основе расчета материальных и тепловых балансов, проведения сквозного энерго-экологического анализа, и расчета величины вредных выбросов, в том числе парниковых выбросов. Все расчеты в рамках оценки эффективности усовершенствованных способов выплавки сталей выполнены автором самостоятельно. В обсуждении результатов материальных и тепловых балансов, а также сквозного энергоэкологического анализа усовершенствованных способов выплавки легированной ванадием стали принимала участие Н.В. Соловьева. Лабораторные испытания выплавки высокомарганцевой стали проведены с помощью А. Невирковецца (A. Newirkowez) и Г. Хиллса (G. Hills).

**Апробация работы.** Работа была поддержана и финансировалась: по совместной программе Министерства образования РФ и Германской службы

академических обменов «Михаил Ломоносов 2009/2010» в области технических наук.

Результаты работы представлялись как существенные достижения на студенческих, областных и всероссийских конкурсах. В том числе, присужден Диплом первой степени за работу «Усовершенствование процесса «легирование прямое». Разработка моделей и алгоритмов анализа и оценки эффективности процесса» на конкурсе под патронажем Министерства образования и науки РФ, Правительства Свердловской области и Министерства природных ресурсов, а также Гран-при конкурса инновационных предприятий и проектов «Грани будущего» за работу «Усовершенствованный способ получения легированной ванадием стали».

Результаты работы докладывались на студенческих, всероссийских и международных конференциях, как в нашей стране, так и за рубежом: X, XI, XII и XIV отчетных конференциях аспирантов и молодых ученых УГТУ-УПИ, 2006-2008; XV Международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии», НМетАУ, г. Днепрпетровск, Украина, 7-9 октября 2008; Отчетной конференции стипендиатов программы «Михаил Ломоносов», Бонн, Германия, 2009; Отчетной конференции стипендиатов программы «Михаил Ломоносов», Москва, 2010.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 19 печатных работ (в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и 4 заявки на изобретение). Список публикаций автора прилагается.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав и списка литературы. Объем работы 183 страницы, она включает в себя 35 рисунков и 45 таблиц. Список цитированной литературы включает 113 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Диссертационная работа выполнена на кафедре автоматизации, Уральского Федерального Университета. Лабораторные исследования по выплавке высокомарганцевистой стали проведены в институте металлургии Технического Университета Клаусталь (Германия).

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** дается описание проблем в области выплавки легированных ванадиевых и марганцевых сталей и сплавов. Отмечается, что до 87% ванадия используют в черной металлургии как эффективную легирующую добавку при производстве сталей различного сортамента. Описана пирометаллургическая переработка ванадийсодержащего титаномагнетитового сырья по коксодоменной и бескоксовой технологическим схемам.

Показано, что одним из основных преимуществ бескоксowych схем переработки ванадийсодержащих титаномагнетитовых руд является замена кокса другими видами топлива. Использование кокса приводит к существенным выбросам вредных веществ в атмосферу, поэтому бескоксowe схемы являются «альтернативными» для дальнейшего развития и исследования процессов выплавки легированных ванадием сталей.

Описан разработанный и усовершенствованный альтернативный способ прямого легирования стали ванадием – процесс легирования прямое (ЛП). Данный способ обеспечивает разумный компромисс между требованиями экологичности и экономичности, а его основные преимущества - бескоксowость и безотходность, что достигается за счет использования на стадии выплавки стали продуктов, полученных на предыдущих стадиях (полупродукта печи ПЖВ и металлизированных



окатышей ШП). Продемонстрированы резервы для уменьшения расхода топлива за счет использования тепла энергоносителей.

Рассмотрены основные недостатки и возможности усовершенствования метода ЛП.

Показано, что вопросы выплавки высоколегированной марганцевой стали также являются крайне актуальными для мировой и российской металлургии, поскольку марганец способен существенно повышать ряд эксплуатационных характеристик сталей и сплавов. Так, добавки 15-25% марганца в высоколегированную сталь резко улучшают прочность, параллельно уменьшая вес и расход сплава. Высокое содержание марганца в стали стабилизирует аустенит и обуславливает появление ТРИП (TRIP-Transformation-Induced Plasticity<sup>\*</sup>) и ТВИП (TWIP-Twinning-Induced Plasticity<sup>†</sup>) эффектов. При этом основной проблемой марганцевых продуктов является присутствие фосфора, углерода, кремния и селена, содержание которых в высокомарганцевой стали снижает ее качество и эксплуатационные возможности.

**Во второй главе** описаны методики оценки сквозной энерго-экологической эффективности разрабатываемых металлургических процессов, такие как классический балансовый метод, балансово-обменный подход к понятию интенсификации технологических процессов, расчет технологических топливных чисел (ТТЧ) готовой продукции и другие.

Анализ энергопотребления в технологии с помощью «энергетического подхода», включает использование энергетических балансов для выявления потерь энергии на отдельном энерготехнологическом агрегате, причины их выявления и пути устранения. Балансовые подходы для оценки ресурсосбережения дают итоговые показатели процесса.

Для объективной оценки возможностей энергосбережения недостаточно анализировать и оптимизировать расходы энергоресурсов в отдельно взятом технологическом переделе и по отдельным энергоносителям. Необходимо повысить интегральный коэффициент использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на конечную продукцию с учетом как расходов всех видов ТЭР на всех стадиях технологического процесса от добычи сырья и топлива до производства конечной продукции, так и ее качества. Решение этой задачи обеспечивает энергетический анализ, в частности, метод расчета **технологического топливного числа (ТТЧ)** процесса или изделия как научное направление, находящиеся на стыке экономики, энергетики и технологии и основанное на расчете сквозных суммарных затрат энергии в их иерархической последовательности.

Основным показателем энергетического анализа является ТТЧ – это суммарные расходы всех видов энергии в данном и во всех предшествующих производствах технологического процесса, пересчитанные на необходимое для их получения первичное топливо, за вычетом ТТЧ параллельно полученных продуктов и первичного топлива, сэкономленного при использовании произведенных вторичных ресурсов.

В качестве показателя оценки экономического ущерба, причиняемого загрязнением окружающей среды, принято **технологическое экологическое число (ТЭЧ)** – это количество килограммов условного топлива (кг у. т.), требуемое для погашения стоимости экономического ущерба от вредных выбросов на

---

<sup>\*</sup>Transformation-Induced Plasticity (англ.) - Пластичность, обусловленная превращением.

<sup>†</sup>Twinning-Induced Plasticity (англ.) – Пластичность, обусловленная двойникованием.

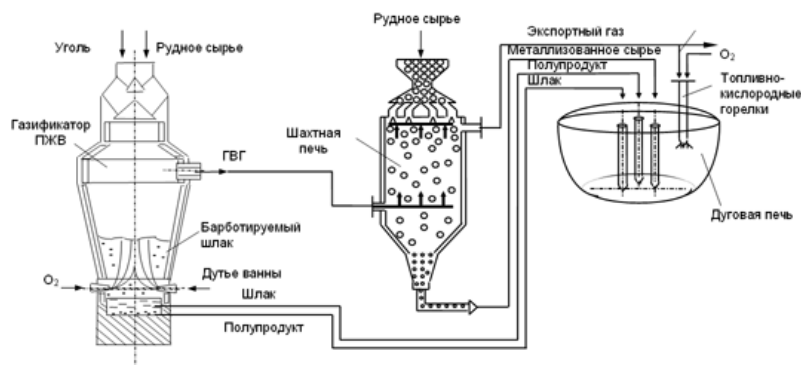
единицу выпускаемой продукции. При этом для удобства расчетов за стоимость топлива принята цена природного газа.

При проведении комплексного сквозного энерго-экологического анализа (СЭЭА) используется показатель **технологическое топливно-экологическое число (ТТЭЧ)**, равное сумме ТТЧ и ТЭЧ, являющийся итоговой оценкой энергоэкологических затрат для производства продукции:

Таким образом, в данной работе для анализа и оценки энерго-экологической эффективности новых процессов выплавки легированных ванадием сталей и высокомарганцевых сталей использовалась методика расчета материальных и тепловых балансов, а также проведение на их основе сквозного энерго-экологического анализа с последовательным расчетом параметров ТТЧ, ТЭЧ, ТТЭЧ и ТПЧ.

**В третьей главе** «Совершенствование бескоксового процесса выплавки легированной ванадием стали – процесс ЛП-Э» усовершенствована схема процесса ЛП и рассчитаны материальные и тепловые балансы всех агрегатов технологической цепочки процесса.

Согласно исходной схеме, процесс ЛП состоит из трех основных агрегатов: печь жидкофазного восстановления (ПЖВ), шахтная печь (ШП) для металлизации окатышей, а также электродуговая печь для выплавки легированной стали (ЭДП) (рис. 1).



**Рис. 1.** Процесс бескоксовой безотходной переработки ванадийсодержащего рудного сырья с прямым легированием стали ванадием

Соотношение продуктов выхода ШП и ПЖВ должно быть таким, чтобы все продукты, получаемые при протекании этих процессов, использовались в полном объеме (а именно, ГВГ печи ПЖВ должны быть полностью использованы в ШП при металлизации окатышей). Изначально предполагалось использовать в шихте ЭДП производимый в ПЖВ чугуны и производимое в ШП сырье в полном объеме. При этом оптимальное соотношение выхода продукта ШП (металлизированных окатышей) и ПЖВ (чугуна), удовлетворяющее условию безотходности производства, составило 70% и 30% соответственно.

Наиболее выгодный компонент шихты ЭДП с точки зрения чистоты по примесям - это горячее металлизированное сырье, которое является к тому же источником ванадия для его прямого восстановления в стали. Допустимое количество металлизированного сырья в шихте, несмотря на чистоту губки по фосфору и сере, зависит от качества металлизированных окатышей и определяется, в первую очередь, содержанием железа ( $Fe_{общ}$ ).

Однако использование в металлошихте электропечи 70% металлизированных окатышей с содержанием  $Fe_{общ} = 76\%$ , наряду с использованием при выплавке стали шлака из ПЖВ, приводит к повышенному шлакообразованию, и,

следовательно, к повышенному расходу электроэнергии на проплавку пустой породы металлизированных окатышей.

Наиболее выгодным компонентом шихты ЭДП с точки зрения энергозатрат является горячий чугун, так как при его использовании существенно снижаются затраты электроэнергии. При 20-30% жидкого чугуна в шихте ЭДП расход электроэнергии становится ниже 300 кВт·ч/т. При увеличении доли чугуна в составе шихты (опытные плавки были проведены в ЮАР) до 50% расход электроэнергии снижается до 250 кВт·ч/т.

С учетом этого содержание чугуна в шихте ЭДП было увеличено с 30% до 40% с целью снижения расхода электроэнергии на выплавку стали. Оставшиеся 30% металлошихты ЭДП составляет углеродсодержащий лом.

Таким образом, с учетом специфики процесса ЛП и реализуемости электроплавки состав шихты ЭДП был представлен следующим: 30% углеродсодержащего лома, 40% чугуна из печи ПЖВ и 30% металлизированных ванадийсодержащих окатышей из шахтной печи.

Однако при выплавке в электропечи совместно ванадийсодержащего чугуна и металлизированных окатышей весь ванадий чугуна переходит в шлак. Это объясняется тем, что для обеспечения чистоты стали по фосфору сначала необходимо проплавлять чугун и лом с целью перевода в шлак содержащегося в них фосфора, а затем проплавлять чистое по примесям металлизированное сырье.

С целью максимального извлечения ванадия на всех стадиях технологической цепочки процесса ЛП с учетом опыта извлечения ванадия в других процессах переработки ванадийсодержащего сырья была реализована деванадация ванадийсодержащего чугуна перед подачей его в ЭДП. В качестве деванадатора используется кислородный конвертер или ковш.

Также с целью сохранения и дальнейшего использования ванадия из чугуна ПЖВ, ванадийсодержащий чугун с температурой 1500<sup>0</sup>С, содержащий до 0,47% V и 4% С, поступает в деванадатор, где проводят продувку чугуна кислородом с целью окислить ванадий и перевести его в шлак. За время продувки окисляется 90-95% ванадия, а также часть углерода. Полученный ванадиевый шлак с содержанием 18-20% оксидов ванадия можно использовать в дальнейшем для получения феррованадия. Горячий рафинированный полупродукт, содержащий менее 0,04% V и 2,5-3% С из деванадатора поступает в ЭДП с температурой 1300-1350<sup>0</sup>С.

Таким образом, в процессе ЛП параллельно производится три вида продукции: легированная ванадием сталь, а также металлизированное сырье и ванадиевый шлак, используемые в качестве товарных продуктов.

Однако осталась проблема сравнительно высокого содержания Р в сталях и рационализации использования топливных ресурсов и шихтовых материалов.

Технической задачей в ходе в данной работе является обеспечение улучшения качества легированного металла, снижение выбросов сернистых газов в атмосферу при прямом легировании сталей и сплавов, и увеличение производительности установки.

Эта задача решается введением электроэнергии в агрегат ПЖВ как дополнительного источника энергии для нагрева и расплава шихтовых материалов, процесс ЛП-Э. Эта схема получила название: Способ бескоксовой переработки рудного сырья с получением легированной ванадием стали.

Таким образом, усовершенствованная схема состоит из тех же трех основных агрегатов – агрегат ПЖВ (газификатор), шахтная печь (ШП) и электро-дуговая

печь (ЭДП). В газификаторе происходит получение горячих восстановительных газов и чугуна, при температуре 850-1050 °С, путем газификации угля. В ШП идет загрузка сырья (металлизированные окатыши) и подача горячих восстановительных газов, и последующая металлизация окатышей. В ЭДП происходит плавка металлизированного сырья с получением легированной ванадием стали.

Однако необходимая температура в газификаторе поддерживается путем дополнительного электрического нагрева, заменяющего часть расхода угля, причем соотношение расхода электроэнергии и угля составляет до 2,3 к 1. Таким образом, уголь используется только для восстановления, а не для нагрева и расплава шихтовых материалов.

Процесс газификации для получения восстановительного газа для целей металлизации сырья осуществляется в газификаторе, работающем таким образом на двух источниках энергии – электрической и энергии угля. При этом затраты энергии на нагрев и плавление исходных материалов газификатора, работающего с использованием жидкой барботирующей, шлаковой ванны или с коксовой насадкой, компенсируются с использованием электрической энергии, а углеродсодержащие материалы используются лишь для получения восстановительного газа и восстановления исходных рудных материалов.

Расчеты показывают, что в тепловом балансе газификатора горячих восстановительных газов, работающем в смешанном режиме, 75% подводимой энергии отводится на нагрев и плавление исходных материалов (рудный концентрат, уголь, флюсы) и переходит в теплосодержание, а остальная часть энергии расходуется на получение восстановительных газов и восстановление металла из рудных материалов (эндотермические реакции). Таким образом, до 75% подводимой энергии заменено на электрическую энергию. При этом расход угля сокращается до 75%, и, соответственно, уменьшается содержание серы и фосфора в восстановительном газе и чугуне.

В частности, при содержании пентаоксида фосфора  $P_2O_5$  в угле 0,1% его содержание в металле без использования электроэнергии составляет в среднем 0,05 – 0,1%, а с использованием электрической энергии в количестве 15% по теплу содержание фосфора в металле снизится и составит примерно 0,015 - 0,03%.

Это позволяет при дальнейшем поступлении металлизированного сырья (концентрат, окатыши) и чугуна в дуговую электропечь для получения легированной стали (сплава) без осложнений проводить окислительный и восстановительный период плавки, так как перевод фосфора в восстановительный период из шлака в металл будет меньше, чем при применении в качестве источника энергии в газификаторе только угля. При предлагаемом способе отпадает необходимость в получении дополнительной теплоты за счет частичного дожигания восстановительных газов над шлаковой ванной.

Применение электрической энергии в газификаторе позволяет, таким образом, отказаться от использования дожигания оксида углерода, с помощью кислорода верхних фурм газификатора. При этом возрастает восстановительный потенциал восстановительных газов, что приводит к ускорению процесса металлизации и увеличению степени металлизации в шахтной печи. Это в свою очередь, приводит к снижению длительности плавления в электропечи и увеличению производительности процесса. Кроме того, требуемый расход кислорода сокращается на 40-50%.

Схема процесса ЛП-Э представлена на рис. 2.



степени дожигания 20% с кислородным дутьем верхних фурм, и процесс ЛП-Э (степень дожигания 0%), работающий на двух источниках энергии – энергия сгорания угля и электрическая энергия.

Чугун, полученный в печи ПЖВ, используется на стадии выплавки стали в ЭДП в качестве компонента шихты, поэтому необходимо определить его химический состав для расчетов. Содержание С, Si и Mn в чугуне приняли 4%, 0,2% и 0,2% соответственно. Расчеты перехода элементов в чугун проведены на основе материального баланса ПЖВ.

При усовершенствованном способе ЛП, описанном ранее, основной приход тепла в ванну осуществлялся из зоны дожигания. При осуществлении плавки на установке Ромелт в нормальных условиях степень передачи от дожигания шлаковой ванне составляет 65-70%, а потери в верхние кессоны – 20% от тепла зоны дожигания.

При предлагаемом нами способе ЛП-Э тепло, необходимое на нагрев и плавку исходных материалов, обеспечивается электроэнергией.

С учетом специфики процесса ЛП-Э основными источниками тепла, обеспечивающими протекание процессов в ЭДП, являются: электроэнергия на плавку и тепло, вносимое шихтой (горячим полупродуктом и горячими металлургическими окатышами). Также источником тепла является экзотермические реакции.

Анализ энергозатрат и вредных выбросов в атмосферу для усовершенствованного процесса ЛП-Э проведен по методике сквозного энерго-экологического анализа. Для оценки полученных результатов также по методике СЭЭА проведен анализ энергозатрат и вредных выбросов для первоначальной схемы выплавки стали с кислородом верхних фурм ПЖВ, затем сделан сравнительный анализ полученных результатов.

Итогом проведенной работы являются следующие результаты:

1. Усовершенствована схема процесса ЛП. Усовершенствованный процесс – процесс ЛП-Э – направлен на повышение качества легированной ванадием стали. Новая схема получила название **Способ бескоксовой переработки рудного сырья с получением легированной ванадием стали**. (Патент на изобретение № 2318024, приоритет от 13 апреля 2006 года).
2. С целью максимального снижения расхода угля, и, как следствие, повышения восстановительного потенциала ГВГ, предложено использовать агрегат ПЖВ, работающий на двух источниках энергии – электроэнергии и энергии сгорания угля. В тепловом балансе газификатора горячих восстановительных газов, работающем в смешанном режиме, 75% подводимой энергии отводится на нагрев и плавление исходных материалов (рудный концентрат, уголь, флюсы) и переходит в теплосодержание, а остальная часть энергии расходуется на получение восстановительных газов и восстановление металла из рудных материалов (эндотермические реакции). Поэтому до 75% подводимой энергии заменено на электрическую энергию, расход угля сокращается до 75%, и, соответственно, уменьшается содержание серы и фосфора в восстановительном газе и чугуне. Поступление серы и фосфора из угля в чугун уменьшается до 55 % и, соответственно, снижается содержание этих элементов в сталях.
3. С учетом специфики процесса рассчитаны материальные и тепловые балансы каждого из агрегатов процесса ЛП-Э. Рассчитан сквозной энерго-экологический баланс в форме технологических топливных чисел. На основе анализа результатов сделана оценка эффективности процесса ЛП-Э. Анализ

показал, что энергоемкость и количество вредных выбросов в атмосферу дополнительно снижается на 0,4 % по сравнению с процессом ЛП, и на 7,4 % по сравнению с традиционной схемой. При этом содержание вредных примесей в чугуне, и, как следствие, в выплавляемой легированной стали, снижается до 55%, то есть при снижении энергоемкости и количества вредных выбросов в процессе ЛП-Э качество стали повышается.

4. Выявлены резервы для уменьшения расхода кислорода за счет использования электронагрева. Требуемый расход кислорода сокращается на 40-50%. При этом также снижается расход электроэнергии в дуговой электропечи и увеличивается ее производительность. Кроме того, снижается содержание серы в отходящих газах шахтной печи металлизации.
5. Применение электрической энергии в газификаторе позволяет отказаться от использования дожигания оксида углерода, осуществляемого с помощью кислорода верхних фурм газификатора. При этом на 45 % возрастает восстановительный потенциал восстановительных газов, что приводит к ускорению процесса металлизации и увеличению степени металлизации в шахтной печи. Это, в свою очередь, приводит к снижению длительности плавления в электропечи и увеличению производительности процесса.
6. По аналогии с технологическим топливным и экологическим числами (ТТЧ и ТЭЧ) было введено понятие *технологического парникового числа* (ТПЧ) – это количество килограммов условного топлива (кг у.т.), требуемого для погашения стоимости экономического ущерба от выбросов парниковых газов на единицу выпускаемой продукции. Рассчитана величина парниковых выбросов – ТПЧ. Расчет величины ТПЧ показал, что усовершенствование схемы ЛП путем введения дополнительного источника энергии в ПЖВ – электроэнергии – снижает величины парниковых выбросов в три раза (чем для предыдущей схемы ЛП), за счет резкого сокращения расхода угля.

**В четвертой главе** «Способ выплавки легированной ванадием стали в дуговой печи» вновь анализируются проблемы выплавки легированных ванадиевых сталей и пути их решения.

Обеспечение прямого легирования стали ванадием при увеличении качества стали за счет уменьшения в ней примесей цветных металлов, а также снижение энергетических и материальных затрат, является весьма актуальной задачей. Эта задача решается тем, что в предлагаемом усовершенствованном способе выплавки легированной ванадием стали используется конверторный ванадиевый шлак, металлургический лом и чугун в шихте.

В данном способе в шихте дуговой электропечи применяются металлизированные окатыши или брикеты, не содержащие оксида титана (30-50%), ванадийсодержащий или литейный чугун (10-15%) и металлический лом 35-60%. Доля первородной шихты металлического лома при выплавке легированной ванадием стали уменьшится в 1,5-2,5 раза, что соответственно приводит к снижению насыщения стали цветными металлами. При этом наличие в шихте конверторного ванадиевого шлака в количестве 2-10% от массы металлизированных окатышей (или брикетов) обеспечивает легирование стали ванадием до 0,07 и 0,4% соответственно. А при наличии в ванадиевом чугуне до 0,5% ванадия и доле чугуна 10-15% от массы металлошихты, содержание ванадия в стали дополнительно увеличивается на 0,04-0,065%. В случае необходимости содержания ванадия в стали до 0,3% и доле ванадиевого шлака 8-10% от массы

металлизированных окатышей используется обычный или литейный чугун без содержания ванадия.

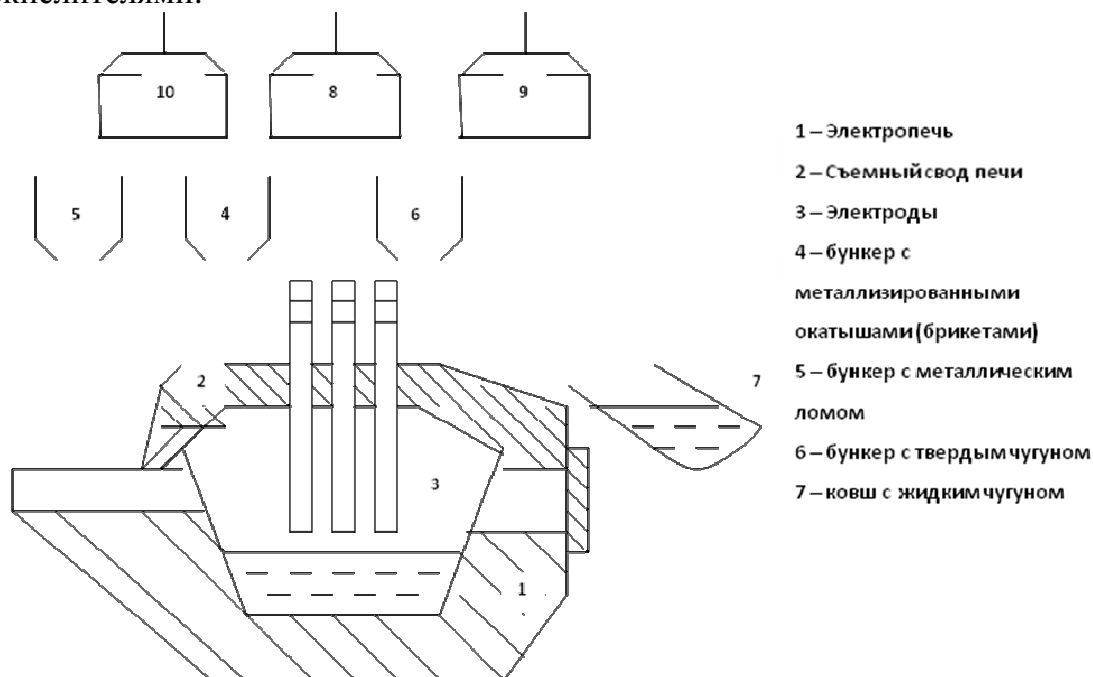
Использование жидкого чугуна вместо твердого приводит к снижению расхода электроэнергии на выплавку стали до 4 кВт/т на 1% жидкого чугуна в шихте.

Нагрев металлизированных окатышей с использованием отходящих газов электропечи (по типу шахтных электропечей) до температуры 300-500<sup>0</sup>С дополнительно снижает расход электроэнергии дуговой электропечи на 7-10%. При этом, при наличии в отходящих газах восстановительных газов (оксид углерода, водород), происходит довосстановление железа в металлизированных окатышах на 2-3%, что приводит к уменьшению выхода шлака и дополнительному снижению расхода электроэнергии в дуговой электропечи.

Технология реализации данного способа заключается в первоначальной загрузке в электропечь металлического лома и шлакообразующих, прогреве шихты, загрузке твердого или заливки жидкого чугуна, загрузке и прогреве металлизированных окатышей или брикетов, плавлении металла, загрузке конверторного ванадиевого шлака, продолжении плавления металла, проведение восстановительного периода, доводке к выпуску металла.

Данный способ реализуется в печах как переменного, так и постоянного тока. Однако в печах постоянного тока обеспечиваются лучшие возможности реализации окислительного и восстановительного периода плавки вследствие лучшего взаимодействия шлака с более спокойной металлической ванной.

Устройство, представленное на рис. 3, включает в себя электропечь 1 со съемным сводом 2, электродом 3, газоходом 4, бункеры 5 – с металлическим ломом, 6 – с твердым чугуном; ковш 7 с жидким чугуном; 8 – бункер с металлизированными окатышами или брикетами; 9 – загрузочное устройство с конверторным ванадиевым шлаком; 10 – загрузочное устройство с известью; загрузочное устройство с дополнительными легирующими элементами и раскислителями.



**Рис. 3.** Способ выплавки стали в электродуговой печи, процесс ЛП-Ш

Процесс идет следующим образом. В электропечь 1 с использованием съемного свода 2 из бункера 5 загружается металлический лом, с использованием



загрузочного устройства 10 загружается известь. С каждого электрода 3 проводится нагрев и проплавление шихты. Из бункера 6 в электропечь загружается твердый чугун или из ковша 7 заливается жидкий чугун. Металлизированные окатыши и брикеты загружаются через бункер 4. Подача конверторного ванадиевого шлака проводится с помощью загрузочного устройства 9. Подогрев металлизированных окатышей или брикетов и их довосстановление отходящими газами электропечи осуществляется путем присоединения электропечи 1 через газоход к бункеру (шахте) с металлизированным сырьем. Введение дополнительных компонентов шихты и раскислителей осуществляется загрузочным устройством 8.

Таким образом, в пятой главе усовершенствована схема процесса ЛП путем повышения эффективности состава шихты электропечи – ЛП-Ш. Усовершенствованный способ ЛП-Ш направлен на легирование стали ванадием. Новая схема получила название **Способ выплавки легированной ванадием стали из комплексной шихты** (Патент на изобретение № 2355780, приоритет от 02 июля 2007 года).

1. С учетом специфики процесса рассчитаны материальные и тепловые балансы электродуговой печи процесса ЛП-Ш. На основе анализа результатов расчетов сделана оценка эффективности усовершенствованного процесса ЛП-Ш;
2. В процессе ЛП-Ш выявлены резервы для снижения в сталях примесей цветных металлов, снижения материальных и энергетических затрат на процесс металлизации окатышей (брикетов) при сохранении их металлической прочности. Использование в шихте жидкого чугуна обеспечивает дополнительное снижение расхода электроэнергии.

**В пятой главе** «Способ производства стали с использованием металлизированного железорудного сырья» проанализирована проблема снижения содержания фосфора, серы и примесей цветных металлов в выплавляемых конструкционных сталях, которая заставляет искать решения по оптимизации состава исходной шихты, по выбору руд и концентратов с определенным составом, по оценке необходимого расхода угля и металлического лома.

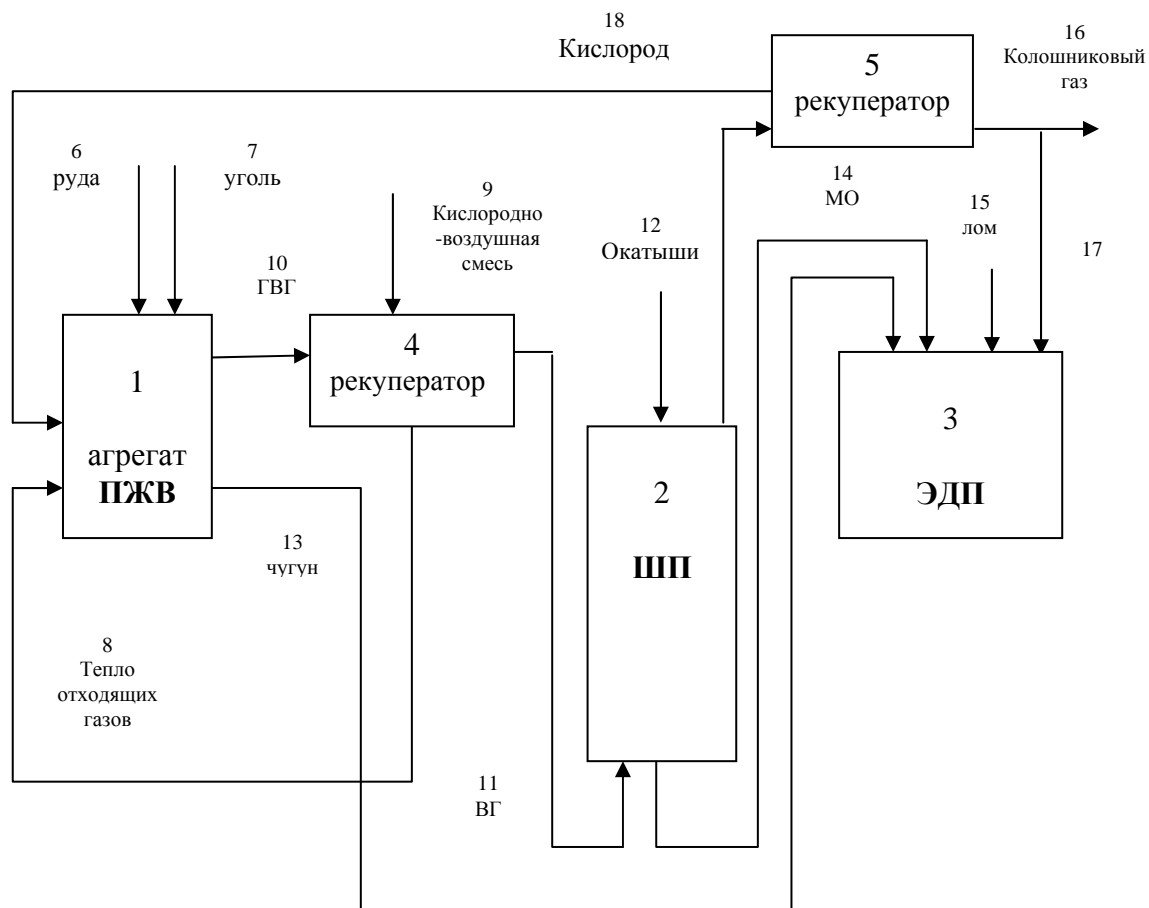
Использование значительного количества угля при выплавке чугуна в агрегате ПЖВ обеспечивает высокое содержание в нем серы и фосфора, а затраты большого количества лома (30-50% от состава шихты) при выплавке стали в ЭДП вызывают перманентное загрязнение стали медью и другими нежелательными примесями.

Способ производства стали с использованием металлизированного железорудного сырья является своеобразным усовершенствованием схемы процесса ЛП, но направлен на производство нелегированной стали с использованием металлизированного железорудного сырья. Способ разработан на кафедре АУТС РИ-РтФ, УГТУ-УПИ совместно с уральским региональным отделением Академии инженерных наук.

Целью настоящего усовершенствования являлось повышение теплового КПД процесса металлизации и выплавки стали, снижение расхода угля на получение восстановительного газа и снижение доли лома в шихте электродуговой печи.

В способе производства стали с использованием металлизированного железорудного сырья, в отличие от имеющихся аналогов (в том числе процесса ЛП), в агрегате жидкофазного восстановления и в шахтной печи используются рудные материалы, не содержащие оксида титана. Поэтому температура на входе в

шахтную печь составляет не более 750-830°C, то есть значительно меньше, чем, например, в процессе ЛП. Охлаждение восстановительного газа до указанных температур проводится в рекуператоре, за счет чего идет подогрев кислородно-воздушного дутья, подаваемого на фурмы агрегата ПЖВ. При степени регенерации 0,6 при этом обеспечивается подогрев дутья до 400°C, что приводит к снижению расхода газифицируемого угля на 10-15%. Схема данного способа представлена на рис. 4.



**Рис. 4.** Способ производства стали с использованием металлургического сырья

Она включает агрегат ПЖВ (1), ШП (2), дуговую электропечь (3) и рекуператоры (4) и (5) и работает следующим образом: в агрегат ПЖВ загружается рудный концентрат, не содержащий оксидов титана и ванадия (6), и энергетический уголь (7). В рекуператор 4 подается кислородно-воздушная смесь (9). Получаемый в агрегате ПЖВ горячий восстановительный газ (10) с температурой 1550-1600°C поступает в рекуператор (4), в который подается и кислородно-воздушная смесь (9). Восстановительный газ, охлажденный в рекуператоре 4 до 750-830°C, подается на вход ШП (11). Остальное тепло из теплообменного аппарата идет на подогрев дутья, которое подается на фурмы (8) агрегата жидкофазного восстановления. В шахтной печи (ШП) происходит процесс металлизации окатышей. В ШП поступают окатыши (12) из железорудного материала, не содержащего оксидов титана и ванадия. Получаемый в агрегате ПЖВ чугун и металлизированные окатыши из ШП (14) подаются в дуговую электропечь (3), в которую может загружаться и лом (15), но не более 10% от металлической части шихты. Колошниковый газ ШП (16) используется как экспортный газ, а также может использоваться в топливно-кислородных горелках (17) дуговой электропечи. В рекуператор (5) подается колошниковый газ шахтной

печи, (теплоноситель) и кислород (18), нагреваемый в рекуператоре. Таким образом, теплота колошникового газа используется для нагрева кислорода, подаваемого на верхние фурмы агрегата ПЖВ для частичного дожигания восстановительных газов (степень дожигания до 20%).

Для расчета парниковых выбросов от данного металлургического процесса выплавки легированной стали необходим расчет количества углерода на входе и выходе каждого агрегата технологической цепочки.

Итогом проведенной работы являются следующие результаты:

1. Оптимизирована схема выплавки нелегированной конструкционной стали. Новая схема получила название **Способ производства стали с использованием металлизированного железорудного сырья** (Патент на изобретение №2337971, приоритет от 12 марта 2007 года).

2. С учетом специфики процесса рассчитаны материальные и тепловые балансы каждого из агрегатов усовершенствованного процесса ЛП.

3. В новом способе выявлены возможности для снижения расхода угля на газификацию на 10-15%, а содержания лома до 10% и менее, что дает снижение энергоемкости процесса выплавки стали и обеспечивает первородность шихты, отсутствие вредных примесей цветных металлов в выплавляемой стали и, соответственно, улучшение ее эксплуатационных свойств.

Рассчитана величина парниковых выбросов – ТПЧ. Величина парниковых выбросов снижается вдвое при замене рудного концентрата на беститановые и безванадиевые, по сравнению с процессом ЛП. Это обусловлено сокращением расхода угля и отсутствием необходимости поддерживать высокую температуру (порядка 1500<sup>0</sup>С) на выходе ПЖВ и входе ШП.

$$\text{ТПЧ} = M_{\text{CO}_2} \cdot K_B = 3104 \cdot 3,666 = 11,4 \text{ т у.т./т прод.}$$

**В шестой главе** «Бескоксовый способ получения легированной высокомарганцевой стали» разработана комбинированная схема выплавки высокомарганцевой стали из дешевой низкомарганцевой руды. Способ получил название – Бескоксовый способ получения легированной высокомарганцевой стали. Способ является комбинированным, поскольку сочетает прямое восстановление марганцем; дефосфорацию чугуна; сталелитейное производство в электродуговой печи.

Новая схема выплавки собрана на основе трех технологических цепочек: выплавка марганцевого шлака; выплавка силикомарганца; выплавка марганцевой стали.

Восстановление силикомарганца и марганцевого шлака рассчитано таким образом, чтобы весь фосфор в системе перешел в сталь (чугун). После прохождения первой (марганцевый шлак) и второй (силикомарганец) технологической цепочки весь металл из этих цепочек проходит дефосфорацию и поступает в конверторную печь. Марганцевый шлак и силикомарганец поступают в ковш для десиликации, после чего марганец поступает в следующий ковш вместе с дефосфоризованным металлом, с получением высокомарганцевой стали.

Таким образом, в предлагаемом способе используется бескоксовая схема получения высокомарганцевой стали, включающая предвосстановление марганцевого шлака углем в трубной вращающейся печи, получение силикомарганца, получение марганцевого шлака в ковше, дефосфорацию металла в электродуговой печи, в который уходит весь фосфор системы, выплавку высокомарганцевой стали с содержанием марганца выше 20%.

Бескоксовый способ получения легированной высокомарганцевой стали осуществляли с участием автора в лабораторных условиях в индукционно-вакуумной печи и в муфельной печи в Институте металлургии Технического Университета Клаусталь, Германия.

В муфельную печь загрузили 38 г угля, 160 г марганцевой руды следующего химического состава, мас. %: Mn – 42%; SiO<sub>2</sub> – 4,72%; Fe – 12,69%; P – 0,036%; CaO – 7,25%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,63%; S – 0,14%, и загрузили 138 г железной руды следующего химического состава, мас. %: Mn – 0,048%; SiO<sub>2</sub> – 2,38%; Fe – 58,9%; P – 0,144%; CaO – 0,29%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5,96%; S – 0,086%. Получен на выходе из муфельной печи предвосстановленный марганцовистый шлак и фосфористый чугун следующего химического состава. Этот продукт подавался в индукционно-вакуумную печь вместе с известью (CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>) с получением марганцовистого шлака следующего химического состава: P – 0,0014%; CaO – 6,76%; MgO – 16,56% MnO – 36,34%; SiO<sub>2</sub> – 31,14%; Fe – 0,14%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5,96%; S – 0,26%, и фосфористого чугуна следующего химического состава: Fe – 96,8%; P – 0,27%; C – 2,9%.

Вторая цепочка опыта полностью повторяла первую, но в муфельную печь в шихту добавлялся 64 г песка (SiO<sub>2</sub>), и полученный в индукционно-вакуумной печи марганцовистый шлак с добавлением извести, угля и FeSi дополнительно восстановили в индукционно-вакуумной печи до силикомарганца (Mn, Si, C).

Полученный в первой опытной цепочке марганцовистый шлак и во второй цепочке силикомарганец подавались в ковш для десиликонизации шлака.

Полученный в первой и во второй цепочке фосфористый чугун подавался в конверторную печь для его дефосфорации.

Полученный высокомарганцовистый шлак и дефосфоризированный металл подавались в ковш, с добавлением алюминия.

На выходе опыта получили высокомарганцовистую сталь следующего химического состава, мас. %: P – 0,0014%, C – 3%; Mn – 21%; Fe – остальное.

Осуществление трехступенчатости схемы позволяет, таким образом, использовать низкомарганцевые руды (с содержанием Mn от 20 до 50%) с высоким содержанием фосфора для выплавки высокомарганцевой стали. Таким образом, данный способ направлен конкретно на использование низкомарганцевых руд для производства высокомарганцевой стали, что существенно снижает стоимость конечного продукта.

Схема процесса в промышленном варианте представлена на рис. 5. На этой схеме в трубчатую вращающуюся печь (ТВП 1) подаются марганцевая руда, железная руда и уголь. В ТВП 1 происходит получение предвосстановленного шлака и металла, с использованием угля в качестве восстановителя. Предвосстановленный шлак и металл поступают в рудотермическую печь (РТП 1).

В РТП 1 происходит восстановительная плавка, на выходе которой получен марганцовистый шлак и высокофосфористый чугун. В ТВП2 происходит получение предвосстановленного шлака и металла. Предвосстановленный шлак и металл поступают в РТП 2. В РТП 2 происходит восстановительная плавка, на выходе которой марганцовистый шлак и высокофосфористый чугун. Марганцовистый шлак на выходе РТП 2 поступает в ЭДП1, куда также поступает известь, уголь и ферросилиций (FeSi). На выходе ЭДП1 получен силикомарганец (SiMn) с содержанием Mn 65%. Фосфористый чугун из печи РТП 1 и РТП 2 поступает в цепочку КП1-ЭДП2, где происходит его дефосфоризация. В КОВШ 1 поступает марганцовистый шлак из РТП1 и силикомарганец из ЭДП1. Дополнительно в КОВШ 1 подается известь. Марганец на выходе из КОВШ 1



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен литературный обзор наиболее перспективных схем выплавки легированных ванадием сталей и высокомарганцевых сталей; а также методов энерго-экологического анализа и оценки эффективности металлургических процессов.
2. Сформулированы рекомендации по усовершенствованию схемы ЛП-В, процесс ЛП-Э. Для максимального снижения расхода угля и повышения восстановительного потенциала ГВГ предлагается использовать агрегат ПЖВ, работающий на двух источниках энергии – электроэнергии и энергии сгорания угля. До 75% подводимой энергии заменено на электрическую, расход угля сокращается до 75% и уменьшается до 55% содержание S и P в восстановительном газе и чугуна.
3. Установлено, что применение электрической энергии в газификаторе позволяет отказаться от дожигания оксида углерода с помощью кислорода верхних фурм газификатора. При этом на 45% возрастает восстановительный потенциал газов, что приводит к ускорению процесса и увеличению степени металлизации в шахтной печи.
4. Сформулированы рекомендации по усовершенствованию схемы ЛП-В путем повышения эффективности состава шихты электропечи, процесс ЛП-Ш. Выявлены резервы для снижения в сталях примесей цветных металлов и уменьшения материальных и энергетических затрат на процесс металлизации окатышей. Использование в шихте жидкого чугуна обеспечивает дополнительное снижение расхода электроэнергии.
5. Сформулированы рекомендации по оптимизации схемы выплавки нелегированной конструкционной стали. В новом способе выявлены возможности для снижения расхода угля на газификацию на 10-15%, а содержания лома до 10% и менее, что дает снижение энергоемкости стали и обеспечивает отсутствие вредных примесей цветных металлов в выплавляемой стали и, соответственно, улучшение ее эксплуатационных свойств.
6. Экспериментально определены условия использования низкомарганцевой руды для выплавки высокомарганцевистой стали. Экспериментальные испытания по выплавке высокомарганцевой стали выполнялись по заданию немецкого автомобильного концерна Volkswagen AG, для производства высокопрочной автомобильной стали.
7. Сформулированы рекомендации по проектированию новой бескоксовой схемы выплавки высокомарганцевистой стали с содержанием Mn выше 20%, использование которого позволяет уменьшить поступление P из угля в легируемую сталь до 0,01%, а углерода - до 0,3%, и повысить содержание Mn в стали до 20% и более, что обеспечивает эффект повышенной конструкционной прочности и пластичности стали.
8. Получены результаты расчетов материальных и тепловых балансов каждого из агрегатов усовершенствованных процессов; величины парниковых выбросов через ТПЧ для способа ЛП-Э и нового бескоксowego способа выплавки нелегированной стали.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Попов В.В., Лисиенко В.Г. Оценка эффективности способа бескоксовой переработки рудного сырья с получением легированной ванадием стали на основе материальных и тепловых балансов. Вестник Воронежского государственного технического университета. Том 5, № 6, 2009. с. 117-123
2. Попов В.В., Лисиенко В.Г. Оценка эффективности способа производства стали с использованием металлизированного железорудного сырья. Вестник Воронежского государственного технического университета. Том 6, № 3, 2010. с. 109-115.

### Патенты на изобретения

3. Попов В.В., Лисиенко В.Г. Бескоксый способ получения легированной высокомарганцевой стали. Заявка на патент № 2011128649, приоритет от 11.07.2011.
4. Лисиенко В.Г., Попов В.В. Патент на изобретение № 2337971. Способ производства стали с использованием металлизированного железорудного сырья. Приоритет от 12 марта 2007 года. Россия.
5. Лисиенко В.Г., Попов В.В. Патент на изобретение №2355780. Способ выплавки легированной ванадием стали из комплексной шихты. Приоритет от 02 июля 2007 года. Россия.
6. Лисиенко В.Г., Попов В.В. Патент на изобретение №2318024. Способ бескоксовой переработки рудного сырья с получением легированной ванадием стали. Приоритет от 13 апреля 2006 года. Россия.

### Отдельные статьи и тезисы по теме диссертации

7. Попов В.В., Лисиенко В.Г. Способ выплавки легированной стали в дуговой электропечи – процесс ЛП-Ш. Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2013) с международным участием (Екатеринбург, 28–29 марта 2013 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 302 с., с. 85-89.
8. Попов В.В. Бескоксый способ получения легированной высокомарганцевой стали. Материалы за 7-а международна научна практична конференция, «Achievement of high school», - 2011. Том 30. Технологии. София. «Бял ГРАД-БГ» ООД – 104 стр., с.3-10
9. Попов В.В., Лисиенко В.Г. Модель оценки эффективности способа бескоксовой переработки рудного сырья с получением легированной ванадием стали. Труды XV международной конференции "Теплотехника и энергетика в металлургии", НМетАУ, г. Днепрпетровск, Украина, 7 - 9 октября 2008 г. - Днепрпетровск: "Новая идеология", 2008. С. 179- 180.
10. Попов В.В., Лисиенко В.Г. Описание способа бескоксовой переработки рудного сырья с получением легированной ванадием стали на основе материальных и тепловых балансов. Пече-трубостроение: тепловые режимы,

- конструкции, автоматизация и экология: Труды II Международного конгресса / под ред. В.Г. Лисиенко. Екатеринбург, «Инженерная мысль», 2008.
11. Пареньков А.Е., Юсфин Ю.С., Падерин С.Н., Лисиенко В.Г., Иванов Е.Б., Кондрукевич А.А., Залозная Л.А., Заводяная А.В., Попов В.В. Прогнозные оценки и расчеты процесса получения высокофосфористого чугуна с прямым легированием редкоземельными металлами (РЗМ). АИН на Урале: Научно-практическая и организационная деятельность на рубеже веков. В 4-х т., ч. II. Труды международной научно-практической конференции «Топливно-металлургический комплекс» / Под ред. В.Г. Лисиенко и Ю.Г. Ярошенко. Екатеринбург: Изд-во «Инженерная мысль», 2007, 350 с.
  12. Луценко В.Т., Лисиенко В.Г., Загайнов С.А., Попов В.В., Метелев Н.В., Михеев С.В. Прогнозные расчеты выплавки шарикоподшипниковой стали в электродуговой печи с использованием жидкого чугуна. Промышленные печи и трубы. г. Екатеринбург: Изд-во: ООО НПИФ «Теплотехник», № 2. 2006.
  13. Попов В.В., Лисиенко В.Г. Анализ способа бескоксовой переработки рудного сырья с получением легированной ванадием стали на основе расчета материальных и тепловых балансов. НЗ4 Научные труды XIV отчетной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ: сборник статей. В 3 ч. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. Ч. 1. 423 с.
  14. Попов В.В. Усовершенствованный способ получения легированной ванадием стали. Инновации и бизнес. №4 (5). г. Екатеринбург. 2008
  15. Попов В.В., Лисиенко В.Г. Разработка методов оценки эффективности процессов выплавки легированной ванадием стали методом прямого восстановления. Энергосбережение: состояние и перспективы: Труды VII Всероссийского совещания – выставки по энергосбережению, Екатеринбург 21-24 марта 2006, - Екатеринбург: ООО «РИА «Энерго-Пресс», 2006. с. 55-56.
  16. Попов В.В. Усовершенствование процесса легирования прямое. Разработка моделей и алгоритмов анализа и оценки эффективности процесса. Сборник докладов конференции по энергосбережению и экологии, при поддержке правительства Свердловской области и Министерства природных ресурсов.
  17. Попов В.В., Лисиенко В.Г. Разработка модели оценки эффективности усовершенствованного процесса «легирование прямое». Т-38 Технические науки: Сборник аннотаций научно-исследовательских работ студентов. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2007. с. 75.
  18. Попов В.В. Усовершенствование метода легирования стали «Легирование прямое». Построение модели оценки эффективности. Сборник докладов X отчетной конференции аспирантов и молодых ученых УГТУ-УПИ 2006.
  19. Попов В.В. Методы оценки эффективности процессов выплавки легированной ванадием стали методом прямого восстановления. Сборник докладов конференции «Студент и научно-технический прогресс 2006».